

ANÁLISIS DE DIFERENTES FUENTES DE PRECIPITACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE ESCALA DEL MODELO MIROC5 EN LA CUENCA GUADALQUIVIR, BOLIVIA**ANALYSIS OF DIFFERENT PRECIPITATION SOURCES FOR THE DOWNSCALING OF THE MIROC5 MODEL IN THE GUADALQUIVIR BASIN, BOLIVIA****¹Jhonatan Ureña, ^{1,2}Oliver Saavedra**¹*Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA)*²*Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Universidad Privada Boliviana*

jhonatanurena@upb.edu

(Recibido el 2 de julio 2024, aceptado para publicación el 21 de octubre 2024)

RESUMEN

El uso de datos de precipitación distribuida en modelos hidrológicos es importante para reflejar la variabilidad espacial de los procesos hidrológicos. En este estudio se ha implementado la herramienta HydroBID en la cuenca del río Guadalquivir utilizando tres productos de precipitación: i) estaciones pluviométricas; ii) GSMaP.v6_Gauge; iii) producto combinado GS. Este último se generó combinando el producto con base satelital y la red local de pluviómetros, a nivel de subcuenca. También se implementó el modelo hidrológico con los productos de precipitación y se obtuvo el caudal diario en la red hídrica, mostrando una óptima correlación de 0,99 y eficiencia de 0,96 durante el periodo 2000 – 2016 a nivel subcuenca. Los resultados simulados con el producto combinado GS presentaron mejor similitud a los caudales observados. Posteriormente, se aplicó el método de reducción de escala K-NN al modelo climático global MIROC5 RCP8.5 con las variables de precipitación y temperatura, considerando dos horizontes futuros de análisis, cercano (2031-2060) y futuro lejano (2061-2090). Los resultados muestran que la temperatura presenta patrones y comportamientos similares a los observados, con valores promedios 17 y 18°C, y variaciones de 1.5 y 2.7°C para los escenarios futuro cercano y lejano, respectivamente. En cambio, la precipitación mostró diferentes comportamientos en los tres productos empleados. Los valores de las estaciones pluviométricas y el producto GS presentan una reducción drástica al promedio observado histórico de precipitación empleado, con diferencias de hasta 230 mm/año en promedio. El producto GSMaP presentó valores de precipitación más altos, aproximadamente 80 mm/año sobre el promedio, los resultados de modelación empleando estos datos de precipitación indican que los caudales simulados presentan valores más bajos con respecto a los observados. Los caudales observados presentan un promedio máximo de 40 m³/s en marzo y un mínimo promedio de 3 m³/s en octubre. Por otro lado, los caudales simulados bajo efecto de cambio climático presentan un caudal máximo promedio de 22 m³/s en marzo y caudal mínimo de 3 m³/s en octubre, indicando una reducción de caudal en la época de lluvias.

Palabras Clave: Precipitación, Sensores Remotos, HydroBID, Cuenca Guadalquivir, GCM-MIROC5 RCP8.8.**ABSTRACT**

The use of distributed precipitation data in hydrological models is important to reflect the spatial variability of hydrological processes. In this study, the HydroBID tool has been implemented in the Guadalquivir River basin using three precipitation products: i) rainfall stations; ii) GSMaP.v6_Gauge; iii) combined GS product. The latter was generated by combining the satellite-based product and the local network of rain gauges, at the sub-basin level. The hydrological model was also implemented with the precipitation products and the daily flow in the water network was obtained, showing an optimum correlation of 0.99 and efficiency of 0.96 during the period 2000 - 2016 at the sub-basin level. The results simulated with the combined GS product showed better similarity to the observed flows. Subsequently, the K-NN downscaling method was applied to the MIROC5 RCP8.5 global climate model with the precipitation and temperature variables, considering two future horizons of analysis, near (2031-2060) and far future (2061-2090). The results show that temperature shows patterns and behaviors similar to those observed, with average values of 17 and 18°C, and variations of 1.5 and 2.7°C for the near and far future scenarios, respectively. On the other hand, precipitation showed different behaviors in the three products used. The values of the rain gauges and the GS product show a drastic reduction to the observed historical average of precipitation used, with differences of up to 230 mm/year on average. The GSMaP product presented higher precipitation values, approximately 80 mm/year above the average, the modeling results using this precipitation data indicate that the simulated flows present lower values with respect to the observed ones. The observed flows show a maximum average of 40 m³/s in March and a minimum average of 3 m³/s in October. On the other hand, the simulated flows under the effect of climate change show an average maximum flow of 22 m³/s in March and a minimum flow of 3 m³/s in October, indicating a reduction in flow during the rainy season.

Keywords: Precipitation, Remote Sensing, HydroBID, Guadalquivir Basin, GCM-MIROC5 RCP8.8.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de las aplicaciones de hidrología, el uso de modelos hidrológicos surge como una herramienta para estimación de caudales. Estos modelos representan los procesos naturales del ciclo del agua, a través de la conceptualización de diversas ecuaciones matemáticas de diferente complejidad [1, 2]. Esto está relacionado al tipo de modelo y sus hipótesis planteadas. En base a esta última, los modelos se pueden categorizar en: agregados, semi-distribuidos y totalmente distribuidos [3].

Los modelos conceptuales presentan ventajas en base a las limitaciones en el acceso a la información. Las ecuaciones que rigen este tipo de modelo se hallan mayormente ligadas al manejo numérico del tiempo, más que a las condiciones físicas de la cuenca [4]. Herramientas como HEC-HMS, NAM, HVM, GR4J, son modelos conceptuales aplicados en Bolivia y Latinoamérica en diversos estudios. HEC-HMS, por ejemplo, requiere información climatológica, uso y tipo de suelos. El modelo presenta esquemas para modelación de series continuas de tiempo o para el análisis de tormentas. Algunos proyectos realizados con productos HEC-HMS son: análisis de modelos de elevación para la cuenca del río Colorado [5], análisis de deslizamientos para el departamento de Cochabamba [6], complementando con el modelo hidrodinámico HEC-RAS y el análisis de productos de precipitación satelital con productos combinados [7], además de análisis de modelación continua horaria [8], en la cuenca del río Rocha con HEC-HMS, entre otras aplicaciones que se puede encontrar en la literatura.

Por otro lado, los modelos semi-distribuidos presentan un manejo de datos a través de unidades de respuesta hidrológicas (HRU según sus siglas en inglés) y sus respectivas ecuaciones se acoplan a ello [9]. Teniendo como unidad de trabajo las subcuencas, estos modelos poseen la capacidad de presentar análisis de cada HRU donde las considera como un todo. Dentro de esta familia de modelos se encuentra el HydroBID, SWAT+, WEAP. Este último es bastante empleado en Bolivia, por ejemplo, en la generación del Balance Hídrico Superficial de Bolivia (BHSB) de 2018 [10].

En el caso de HydroBID, es una herramienta desarrollada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) dentro de su programa de recursos hídricos y cambio climático para América Latina y el Caribe [11]. Esta herramienta permite realizar análisis hidrológicos y de cambio climático para estimar la disponibilidad de agua dulce. Este sistema de modelado se basa en la escorrentía mediante las Funciones Generalizadas de Carga de Cuencas Hidrográficas (GWLF), considerando el manejo de variables climatológicas para cada unidad hidrológica que conforma el sistema de estudio. HydroBID cuenta con una base de datos que contiene datos de uso de suelo, presencia de agua y delimitación de unidades hidrológicas, que permite centrarse en la recopilación de datos climáticos y caudales para el funcionamiento del programa.

En Bolivia, el monitoreo de la precipitación se realiza mediante estaciones puntuales en tierra, como pluviómetros. Estas estaciones se encuentran distribuidos en todo el país, con una mayor concentración en las ciudades capitales, dejando grandes extensiones de territorio sin contar con una estación. Por otro lado, la base de datos presenta periodos sin registros debido a fallas provocadas por factores internos o externos [12]. Ante ello, se considera el manejo de productos de precipitación satelital como una alternativa para la integración en modelos hidrológicos. No obstante, debido a su carácter predictivo, los productos de precipitación satelital requieren ser tratados previamente a su implementación en modelos hidrológicos.

Hoy en día, los estudios hidrológicos requieren la integración de modelos climáticos con escenarios de cambio climático como puede ser el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP en inglés), que es un sistema que permite la compilación de diferentes modelos climáticos desarrollados por diferentes entidades a nivel global con el fin de generar simulaciones futuras con variables climatológicas, que incluyen la precipitación y temperatura [13]. Los modelos de CMIP han tenido que actualizarse constantemente, siendo la versión 5 la más empleada durante el periodo 2010-2020. Entre estos modelos se rescata MIROC5 RCP8.5, que presenta diferentes grados de varianza interanual en base a la zona de estudio, siendo más eficientes en regiones alejadas a la línea del Ecuador [14].

El objetivo del presente estudio es analizar el comportamiento de diferentes productos de precipitación: estaciones pluviométricas, satelital y combinada contra el escenario de cambio climático modelo global MIROC5 RCP8.5; La evaluación de la precipitación, temperatura y caudales usando el modelo hidrológico HydroBID en la cuenca Guadalquivir.

2. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Guadalquivir se encuentra en el departamento de Tarija, al sur de Bolivia. La cuenca comprende los municipios de San Lorenzo, Cercado, Uriondo y Padcaya, con una superficie de aproximadamente 3.350 km², equivalente al 9% del área correspondiente al departamento. Geográficamente, la cuenca se encuentra delimitada por la serranía de Sama al oeste y la serranía del Gamoneda al oeste. La población abarcada es de 294.000 habitantes, lo que representa el 51% de la población departamental principalmente debido a la presencia de la ciudad capital del mismo.

El río Guadalquivir tiene una longitud aproximada de 70 km desde su nacimiento con dirección hacia el noreste. La cuenca forma parte de la unidad hidrológica del río Bermejo (Nivel 3 según la división de Pfafstetter nacional) y, a su vez, pertenece a la cuenca de La Plata. La cuenca Guadalquivir presenta un rango de elevaciones entre 1.600 y 4.600 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Esta área cuenta con dos pisos ecológicos nacionales, tierras altas y valles, siendo este último el más predominante (ver Figura 1).

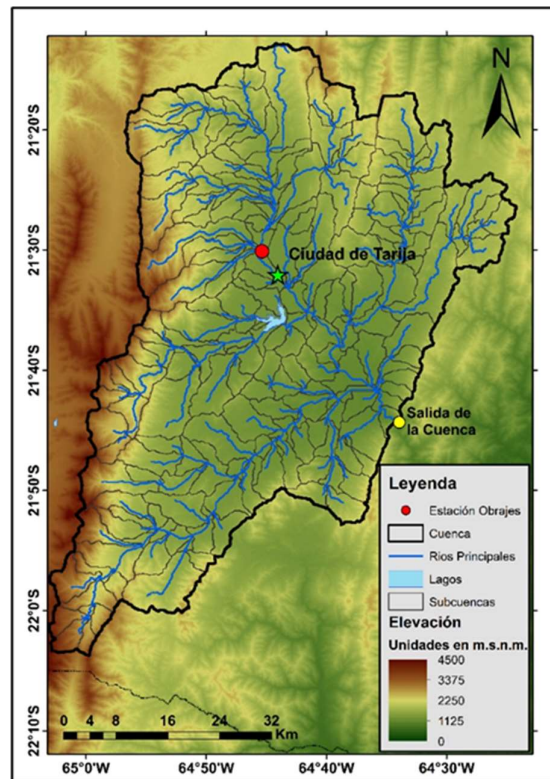


Figura 1: Flujograma de la metodología de investigación aplicada.
Fuente: Elaboración propia.

En términos climatológicos, la cuenca presenta precipitaciones entre 580 y 840 mm/año, ocurriendo los valores más altos al sudoeste de la cuenca. Las temperaturas promedio están entre 9°C y 19°C, con los valores más altos en la parte central de la cuenca de acuerdo con el BHSB [10].

3. METODOLOGÍA

3.1. Datos de Precipitación

La cuenca Guadalquivir presenta 22 estaciones con registros completos distribuidas principalmente en la región norte y central de la cuenca. Adicionalmente, se utilizaron productos de precipitación basados en satélites para comparar la variabilidad en el manejo de fuentes de datos. La gestión de datos climatológicos es uno de los aspectos más importantes de HydroBID. El modelo permite introducir datos climatológicos de manera oportuna mediante un método de interpolación. Específicamente, utiliza el método de ponderación de distancia inversa (IDW en inglés) para obtener un valor representativo para cada subcuenca de la base de datos. En ese sentido, se requiere de una variable que permite considerar el número de estaciones para aplicar la interpolación IDW. Sin embargo, en caso de falta de pluviómetros, se pueden utilizar productos satelitales para conservar el patrón de precipitación.

Se seleccionó el producto satelital GSMaP.v6_Gauge (a partir de este punto GSMaP) como producto de precipitación distribuida. Este producto fue desarrollado por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA). El producto presenta una cuadrícula de 0.1° (aprox. 10 km). Este estudio utilizó el producto a resolución temporal horaria, y luego se acumuló diariamente en función de la diferencia horaria entre Bolivia y la zona de captura de datos inicial.

No obstante, al tratarse de un producto con base satelital, este se halla basado en el término de estimación, llegando a presentar sesgos y es necesario realizar un proceso de corrección. Para ello, se utilizó la metodología combinada propuesta por Saavedra & Ureña (2022) [15] que consiste en la combinación de datos pluviómetros diarios y un producto

de medición de precipitación satelital a través de la reducción del error relativo entre ambas bases de datos a través de iteraciones. Este método utiliza un coeficiente de corrección basado en el error relativo para cada microcuenca.

3.2. Modelo Hidrológico HydroBID

El modelo HydroBID emplea el modelo estándar Factor de Carga de Cauces Generalizados (GWLF abreviado en inglés), que utiliza un sistema de microcuenca y considera el uso del suelo y el tipo de suelo para un análisis de unidad individual. Este modelo ya cuenta con una base de datos preparada para diferentes variables hidrológicas como uso del suelo, tipos de suelo y número de curva. Otra base de datos incluida en HydroBID es la Base de Datos Hidrológico Analítico (AHD en inglés). Debido a esto, el modelo requiere principalmente la introducción de variables climatológicas y datos de flujo observados para realizar la calibración y validación de los parámetros [11]. La Figura 2 muestra la metodología de HydroBID para generar flujos a partir de los productos de precipitación.

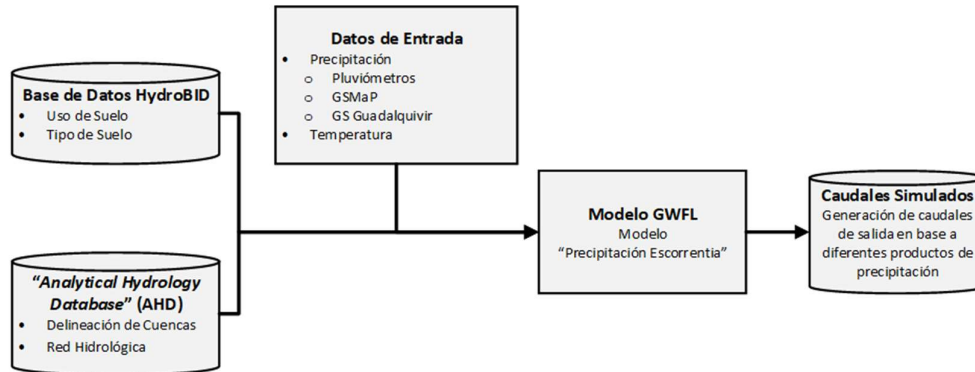


Figura 2: Flujograma de funcionamiento lógico de HydroBID.

Fuente: Traducido de [16].

La simulación de flujo se puede ajustar mediante la gestión de cuatro parámetros. El Número de Curva (CN) permite caracterizar el tipo de uso del suelo y representar la hidrología en el suelo. A cada microcuenca se le asigna un valor de CN. El Contenido de Agua Disponible (AWC en inglés) indica el inicio del proceso de percolación y estima la cantidad de agua que puede almacenarse en el suelo para ser utilizada por las plantas, afectando la infiltración dirigida al agua subterránea. El coeficiente de recesión "r" caracteriza la contribución del agua subterránea cerca de la superficie al flujo del río después de una inundación y controla la tasa del flujo de agua subterránea en la zona saturada. Este parámetro debe ingresarse numéricamente. Finalmente, el Coeficiente de Percolación "s" controla la tasa de percolación hacia el acuífero subterráneo profundo [16].

3.3. Reducción de escala: MIROC5 RCP8.5

Debido a ello, se establecieron diferentes escenarios de proyección de gases efecto invernadero como consecuencia del cambio climático denominados Rutas de Concentración Representativas (RCP en inglés). Para la generación de modelos CMIP5, se manejan cuatro escenarios RCP: 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5; siendo cada uno condiciones de cambio de energía de acuerdo con el calentamiento esperado, empezando con altas medidas preventivas (RCP2.6) hasta manejo ineficiente o nulo (RCP8.5). El modelo global MIROC5, con su escenario de cambio RCP8.5 (escenario crítico ante el aumento de temperatura) fue seleccionado para determinar la afectación en la cuenca Guadalquivir considerando un escenario pesimista.

Para este proceso, se requiere generar datos climatológicos perturbados por el cambio climático. Es por ello que se seleccionó el método K-NN para realizar el proceso de reducción de escala (downscaling en inglés) [17]. Este método utiliza técnicas estadísticas y probabilísticas, para preservar atributos y características que se encuentran presentes en las series históricas de datos con relación a los datos simulados del escenario. Esto permite agrupar en una cantidad aleatoria de grupos, las secuencias de datos climáticos observadas [18].

Este método fue aplicado en diversos estudios en Bolivia, como en el balance hídrico superficial del país para el periodo 1980-2016 [10] y los planes directores de cuenca, como el caso de la cuenca del río Rocha [19], siendo perteneciente a las metodologías Machine Learning para el proceso de reducción de escala. En el presente estudio, se aplicó la reducción de escala para los datos de precipitación puntual de las estaciones hidrológicas, GSMaP y GS; y, para el caso de la temperatura, se empleó los datos de GMET del balance hídrico 1980-2016. Adicionalmente, se consideró dos periodos de análisis futuros de las variables climatológicas: futuro cercano (2031-2060) y futuro lejano (2061-2090).

4. RESULTADOS

4.1. Datos de Precipitación

En el caso de la cuenca del Guadalquivir se utilizaron 230 microcuencas, pertenecientes a la database de HydroBID y fueron empleadas en el proceso de generación de GS. Para ello, se necesitaron cinco iteraciones para alcanzar la convergencia. Este nuevo producto posee una resolución espacial de 250 metros y una temporal del tipo diaria. La Figura 3 muestra la precipitación promedio diaria de los productos empleados.

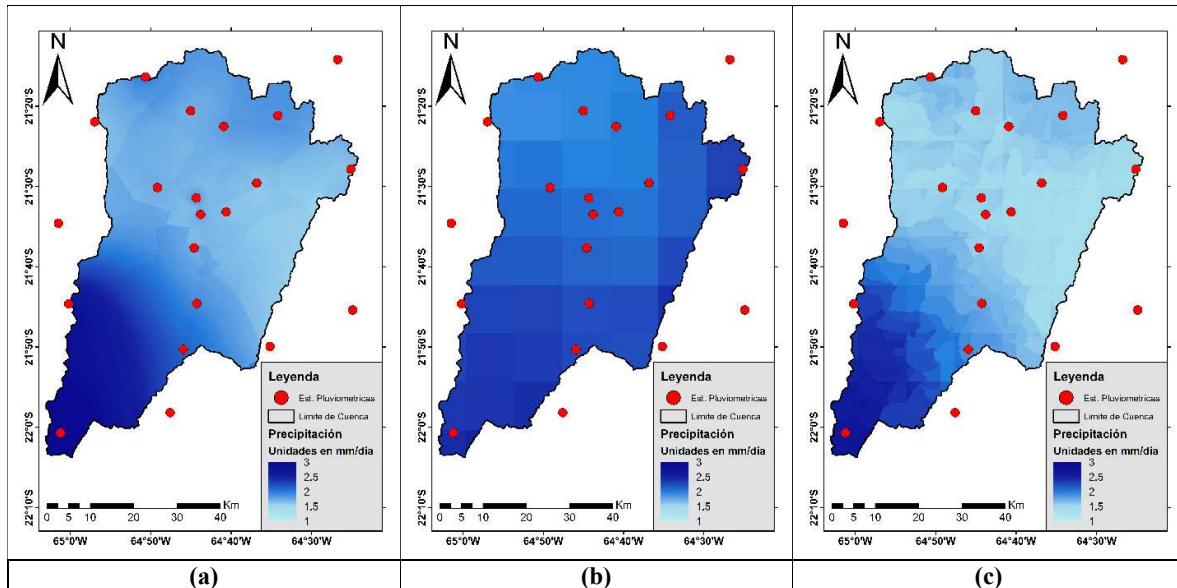


Figura 3: Mapa de Precipitación: (a) Superficie interpolada con estaciones, (b) GSMaP y (c) Producto GS.

Fuente: Adaptado de [16].

En la Figura 4, GSMaP presenta una subestimación generalizada en el periodo 2000-2014. Sin embargo, durante los periodos del 09/2002 al 12/2003 y del 03/2015 al 06/2016, presenta varias sobreestimaciones. Por otro lado, los datos del producto combinado GS presentan valores aproximados a los datos observados en pluviómetros, caracterizados por ligeras subestimaciones al llegar al pico del evento. En el análisis de coeficientes de correlación, GSMaP presenta un valor de 0.54 y para GS un valor de 0.98. Por otro lado, la eficiencia de Nash & Sutcliffe entre las precipitaciones diarias observadas y los productos GSMaP y GS es de 0.25 y 0.97, respectivamente. Dicho valor deriva en base al tamaño de la resolución espacial de cada producto con relación al tamaño de la grilla de la interpolación realizada.

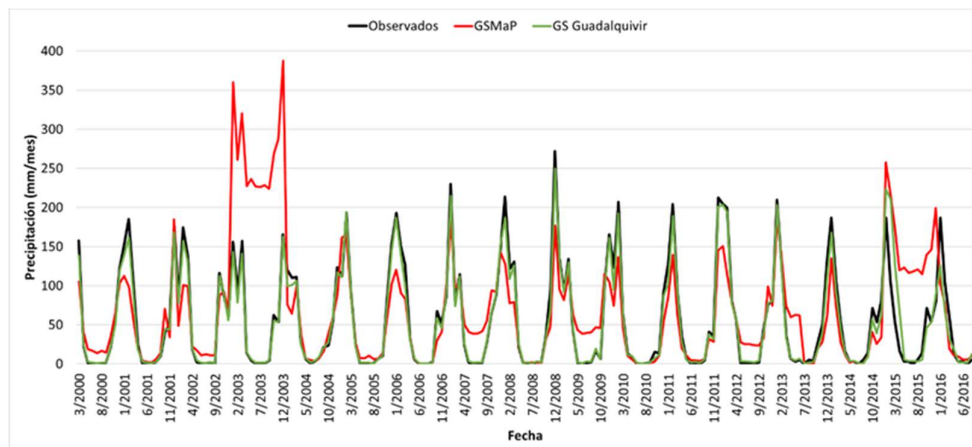


Figura 4: Serie de Tiempo Mensual de productos de precipitación seleccionados para el periodo 03/2000 a 08/2016.

Fuente: Elaboración Propia.

4.2. Modelo Hidrológico HydroBID

Dentro del proceso de calibración y validación del modelo para la cuenca Guadalquivir, se obtuvo los siguientes parámetros: Factor de CN que es igual a 0.46, AWC tiene valor de 0.1, “r” con valor a 0.006 y “s” es 0.008.

En la Figura 5, se observa los caudales generados con las diferentes fuentes de datos de precipitación. En el caso de GSMaP, los caudales modelados presentaron una subestimación generalizada durante todo el periodo de estudio. Sin embargo, durante los periodos 2003-2004 y 2015-2016, se dan casos de sobreestimaciones constantes. Por otro lado, el producto GS presenta la mayor similitud con los valores observados, simulando incluso los valores máximos registrados en 2004 y 2014; no obstante, presenta ligeras subestimaciones en los picos de precipitación de los datos observados. GSMaP presentó una correlación de 0.28 y eficiencia negativa de -2.47, los flujos generados por este producto satelital presentaron sobreestimación. En cambio, GS presentó correlaciones de 0.9 y eficiencia de 0.96, asemejándose a la modelación empleando estaciones pluviométricas.

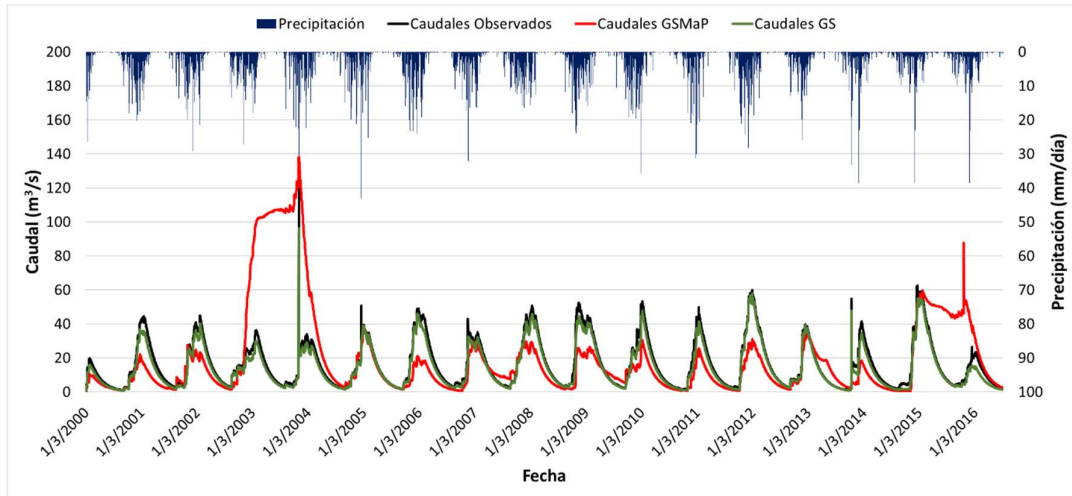


Figura 5: Serie de Tiempo Mensual de productos de precipitación seleccionados para el periodo 03/2000 a 08/2016. Fuente: Elaboración Propia.

Con los caudales simulados, se generaron volúmenes anuales. GS presenta valores similares a los volúmenes observados con ligeras subestimaciones, como presenta la Figura 6. El producto GSMaP presenta volúmenes que superan a los observados en los años 2003, 2004 y 2015; siendo el caso más crítico el de 2003, que llega a tener un volumen mayor a 2500 Hm³ con relación al observado que llega a los 500 Hm³.

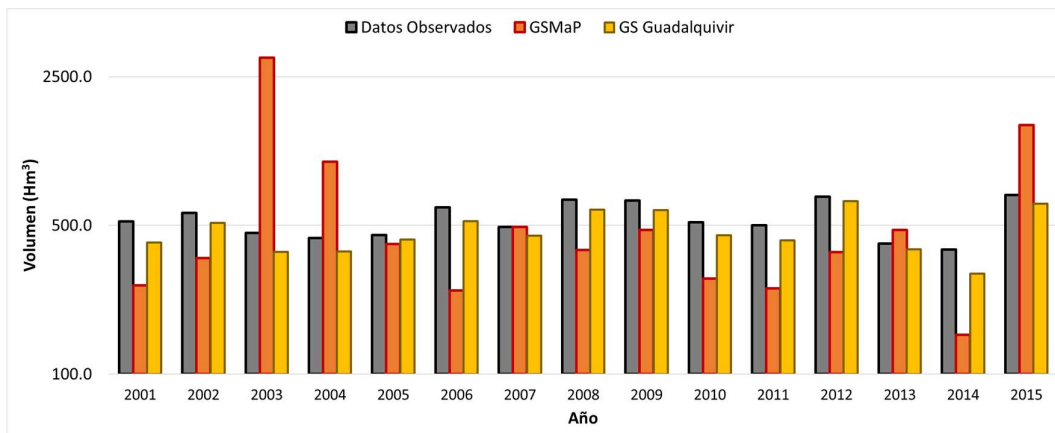


Figura 6: Serie de Tiempo Mensual de productos de precipitación seleccionados para el periodo 2001 a 2015. Fuente: Elaboración Propia.

4.3. Reducción de escala

Como resultado del proceso de reducción de escala, se generaron cinco iteraciones por conjunto de datos de precipitación y temperatura. Se analizó cada uno de estos elementos y se seleccionó la iteración que presentara los rangos menores de

variación del conjunto. Uno de los primeros resultados es la tendencia del aumento de la temperatura por efectos del cambio climático. En la Figura 7a, se observa la tendencia de la temperatura simulada con relación al periodo observado en estaciones; mostrando una tendencia incremental en los tres casos hasta 2099. Los datos simulados presentan valores más altos en el periodo de comparación con los datos observados (2006-2015). Al analizar la temperatura, se puede observar ligeras diferencias entre los valores afectados llegando a valores de 17.1 a 17.3°C en futuro cercano y valores de 18.3 a 18.6 para futuro lejano, de acuerdo con la Figura 7b.

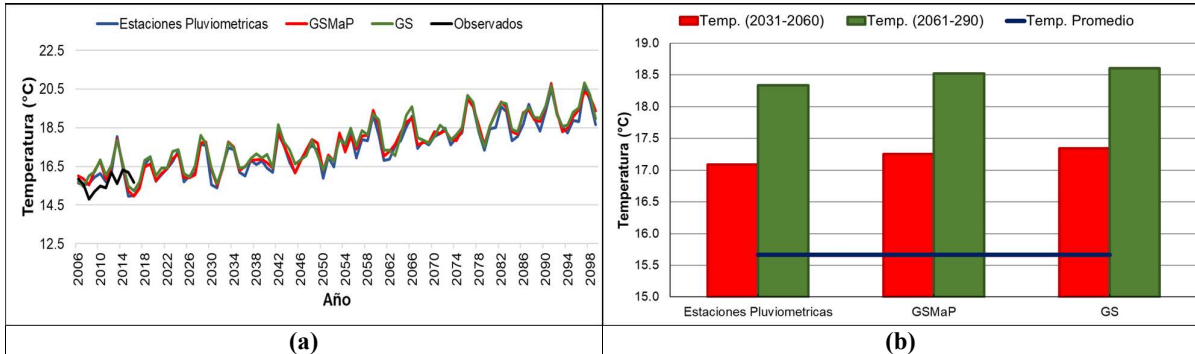


Figura 7: Análisis de la afectación de la temperatura al escenario MIROC5 RCP8.5: a) Serie de Tiempo y b) Comparación de promedios en futuro cercano y futuro lejano.

Fuente: Elaboración Propia.

Para la precipitación, se puede observar que durante el periodo 2006-2016, la precipitación de pluviómetros y GS afectada por cambio climático presentan casos de subestimación general a lo largo de este periodo (Figura 8a). Por otro lado, el producto GSMaP, presentó sobrestimación en los meses secos del mismo periodo. No obstante, analizando el promedio anual (Figura 8b), GSMaP presenta sobrestimación a lo largo del periodo de estudio 2006-2100, con relación a los datos observados. En cambio, estaciones pluviométricas y GS presentan bajas precipitaciones con relación a los datos observados. El caso de sobrestimación de GSMaP puede deberse a las sobreestimaciones que mostró este producto en los periodos 2003-2004 y 2015-2016, afectando directamente al proceso de reducción de escala.

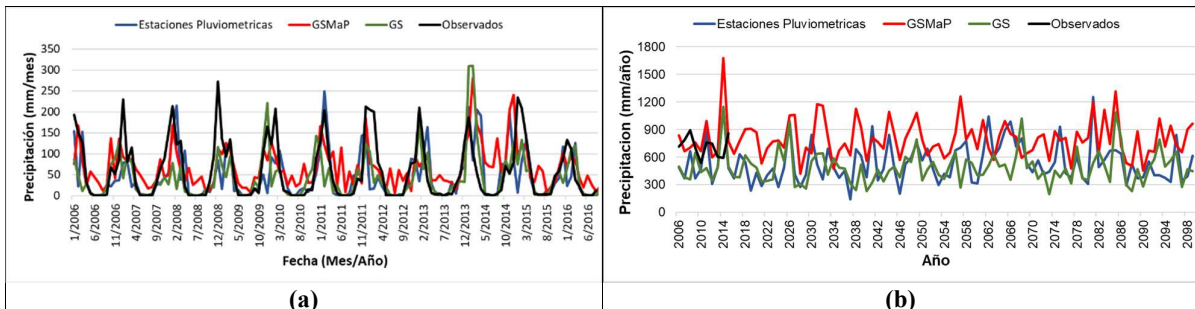


Figura 8. Serie de tiempo para datos afectados por MIROC5, RCP8.5: (a) Periodo comparativo y (b) Periodo de Simulación.

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados de la modelación hidrológica con datos afectados por cambio climático mostraron que la tendencia de los caudales sigue las proyecciones de la precipitación (Figura 9). GSMaP presentó caudales con promedios de 14 m³/s, siendo el producto con un mayor acercamiento a los valores observados (promedio de 17.7 m³/s). Por otro lado, los caudales obtenidos con datos de pluviómetros y GS presentaron valores promedios de 11.8 y 9.4 m³/s, respectivamente. No obstante, a pesar de tener una varianza considerable uno de otros, se observa que los tres productos muestran acuerdo durante años secos que parecen ser reiterativos a lo largo del periodo. Sin embargo, se puede observar que los datos afectados para los datos observados y GS presentan precipitaciones bajas a lo largo del periodo de estudio. Es importante mencionar que son años respecto a la modelación climática y no así un pronóstico de eventos.

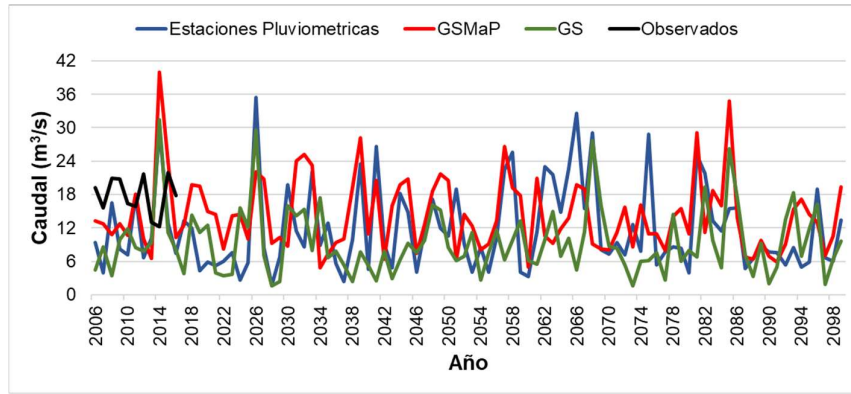


Figura 9. Análisis de datos de caudales: a) Serie de tiempo anual 2006-2099.
Fuente: Elaboración Propia.

En base al análisis mensual por diagramas de cajas de la Figura 10, se puede observar que los datos simulados de caudales son menores en los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo y Diciembre (meses de carácter húmedo) y en el caso de los meses de Junio, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre y Noviembre (meses de carácter seco), GSMaP presenta mayores caudales simulados. Los caudales simulados de estaciones y el producto GS presentan comportamientos similares a lo largo de todos los meses, demostrando similitud en los valores mínimos y en el cuantil 25 de caudales. Sin embargo, los caudales por encima del cuantil 75 presentan mayor variación, siendo los valores de GS menores al esperado. En el caso del manejo de valores atípicos, el conjunto de datos observados presenta la menor cantidad fuera de las cajas (dos en el mes Febrero).

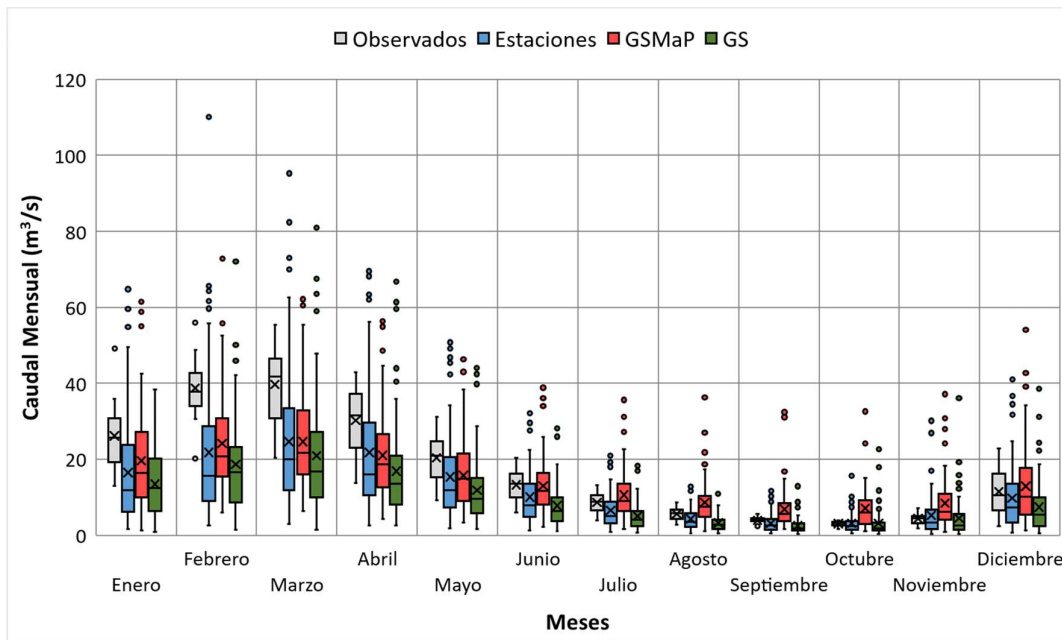


Figura 10. Diagrama de cajas de caudales modelados mensuales para el periodo 2006-2099.
Fuente: Elaboración Propia.

En base a estos resultados, se generaron volúmenes de anuales superficiales y se acumuló en base a los horizontes futuro cercano y lejano. En la Figura 11, se observa que la simulación empleando información de estaciones pluviométricas presenta un volumen cercano de 11 000 hm³. En el caso de GSMaP, el volumen acumulado para el periodo cercano supera los 14 000 hm³ y casi de 13 000 hm³ para el futuro lejano (acercándose al obtenido con pluviómetros). Por último, el producto GS presenta volúmenes de 8 100 y 9 000 hm³, siendo el más bajo en el conjunto de datos.

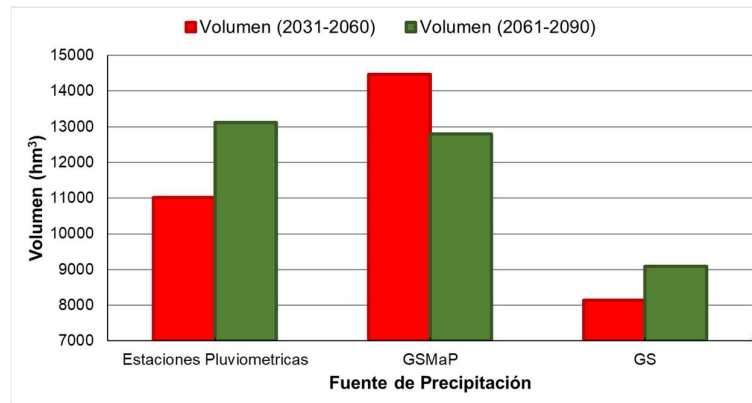


Figura 11. Comparación de volúmenes acumulados de datos afectados por reducción de escala.

Fuente: Elaboración Propia.

5. CONCLUSIONES

En esta aplicación de cambio climático, se ha configurado el modelo hidrológico de la cuenca Guadalquivir utilizando la herramienta HydroBID. Se han realizado simulaciones con diferentes datos de entrada de precipitación y se ha observado que los resultados de las estaciones pluviométricas y el producto GS presentan una mejor correlación en el tema de caudales simulados.

Para el proceso de afectación por cambio climático en la temperatura y precipitación, se empleó el método K-NN como reducción de escala. De acuerdo con los datos utilizados en la modelación hidrológica, las fuentes de datos de estaciones pluviométricas, GSMaP y GS, presentaron valores de temperatura similares a lo largo del periodo de estudio (2006-2099). Según con la proyección del modelo GCM MIROC5 RCP8.5, el grado de calentamiento para el periodo futuro cercano (2031-2060) y futuro lejano (2061-2090), es entre 1.5 y 2.7°C con relación a la media anual, siendo GS el producto con la mayor temperatura promedio 17.3°C (futuro cercano) y 18.6°C (futuro lejano). Dicha variación puede incrementar la posibilidad de aumento de periodos de sequías.

Por otro lado, la precipitación afectada por el cambio climático presentó comportamientos diferentes en comparación a la temperatura. La precipitación promedio de estaciones pluviométricas (540 mm/año) y GS (490 mm/año) presentaron una disminución con relación a los datos observados (720 mm/año) durante el periodo común de datos, lo cual se atribuye al aumento de temperatura. Por su parte, GSMaP presentó un ligero aumento en la precipitación con relación a los datos observados (800 mm/año). Este último puede deberse a la presencia de valores sobreestimados en la base de datos empleada para la afectación.

Como resultado de la modelación hidrológica aplicando el escenario de cambio climático, todos los productos de precipitación presentan caudales más bajos que los observados sin la consideración del escenario. Con un promedio observado de 17.7 m³/s, las modelaciones empleando estaciones, GSMaP y GS con cambio climático presentan caudales promedio de 12, 14 y 9 m³/s. Sin embargo, dichos caudales no presentan correlaciones cercanas entre el manejo de los volúmenes siendo GS el producto que presenta un menor volumen acumulado para un periodo de 30 años (8 100 hm³ para 2030-2060). Por el otro lado, GSMaP presenta el mayor volumen acumulado de 14 000 hm³ para el periodo de futuro cercano mencionado. Lo que sugiere que los parámetros de cada producto podrían ser una fuente de incertidumbre de consideración.

6. AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer las valiosas sugerencias del MSc. Ivan Alexis Chavez Flores, las cuales han permitido mejorar el contenido y redacción del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] E. Moges, Y. Demissie, L. Larsen, and F. Yassin, "Review: Sources of Hydrological Model Uncertainties and Advances in Their Analysis," *Water*, vol. 13, no. 1, p. 28, Dec. 2020, doi: 10.3390/w13010028.
- [2] K. J. Beven, *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*, 2nd ed. Chichester, West Sussex; Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2012.

- [3] H. Chen, S. Huang, Y. Xu, R. Teegavarapu, Y. Guo, J. Xie, and H. Nie, "Quantitative Assessment of Impact of Climate Change and Human Activities on Streamflow Changes Using an Improved Three-Parameter Monthly Water Balance Model," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 17, p. 4411, Sep. 2022, doi: 10.3390/rs14174411.
- [4] P. Darbandsari and P. Coulibaly, "Inter-comparison of lumped hydrological models in data-scarce watersheds using different precipitation forcing data sets: Case study of Northern Ontario, Canada," *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 31, p. 100730, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ejrh.2020.100730.
- [5] J. Li, Y. Zhao, P. Bates, J. Neal, S. Tooth, L. Hwaker, and C. Maffei, "Digital Elevation Models for Topographic Characterisation and Flood Flow Modelling along Low-Gradient, Terminal Dryland Rivers: A Comparison of Spaceborne Datasets for the Río Colorado, Bolivia," *Journal of Hydrology*, vol. 591, p. 125617, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125617.
- [6] W. García F., M. Delfin S., M. Ledezma P., and B. Arévalo S., "Integrando métodos de evaluación de riesgos de deslizamientos e inundaciones en cuencas del Tunari y zona de Alto Cochabamba," *Acta Nova*, vol. 10, pp. 61-95, 2021.
- [7] N. A. Achá, O. C. Saavedra, and J. E. Ureña, "Modelación Hidrológica en la Cuenca del Río Rocha Incorporando Lineamientos de Caudal Ecológico," *I&D*, vol. 22, no. 1, Jul. 2022, doi: 10.23881/idupbo.022.1-5i.
- [8] M. Villazon and I. Maldonado, "Hourly Continuous Hydrologic Modelling of the Rocha River Basin," presented at the XIX Congreso Internacional Región II de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS, La Paz, Bolivia, May 2022.
- [9] P. K. Paul, Y. Zhang, A. Mishra, N. Panigrahy, and R. Singh, "Comparative Study of Two State-of-the-Art Semi-Distributed Hydrological Models," *Water*, vol. 11, no. 5, p. 871, Apr. 2019, doi: 10.3390/w11050871.
- [10] Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), Ed., *Balance Hídrico Superficial de Bolivia (1980 - 2016): Documento de Difusión*. La Paz, Bolivia: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018.
- [11] F. Moreda, F. Miralles-Wilhelm, and R. Muñoz, "Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos. Parte 2," *BID*, Dec. 2014.
- [12] J. Ureña, O. Saavedra, and T. Kubota, "The Development of a Combined Satellite-Based Precipitation Dataset across Bolivia from 2000 to 2015," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 15, p. 2931, Jul. 2021, doi: 10.3390/rs13152931.
- [13] R. Knutti and J. Sedláček, "Robustness and Uncertainties in the New CMIP5 Climate Model Projections," *Nature Climate Change*, vol. 3, no. 4, pp. 369-373, Apr. 2013, doi: 10.1038/nclimate1716.
- [14] R. A. Gutierrez, C. Junquas, E. Armijos, A. A. Sörensson, and J.-C. Espinoza, "Performance of Regional Climate Model Precipitation Simulations Over the Terrain-Complex Andes-Amazon Transition Region," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 129, no. 1, p. e2023JD038618, 2024, doi: <https://doi.org/10.1029/2023JD038618>.
- [15] O. Saavedra and J. Ureña, "Generation of Combined Daily Satellite-Based Precipitation Products over Bolivia," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 17, p. 4195, Aug. 2022, doi: 10.3390/rs14174195.
- [16] O. Saavedra, J. Ureña, and M. Perales, "Implementation of HydroBID Model with Satellite-Based Precipitation Products in Guadalquivir Basin, Bolivia," *Water*, vol. 15, no. 18, p. 3250, Sep. 2023, doi: 10.3390/w15183250.
- [17] S. Gangopadhyay, M. Clark, and B. Rajagopalan, "Statistical Downscaling Using K-Nearest Neighbors," *Water Resources Research*, vol. 41, no. 2, p. 2004WR003444, Feb. 2005, doi: 10.1029/2004WR003444.
- [18] A. Moncada, C. F. Pérez, and H. Angarita, "Escenarios de Cambio Climático: Método k-NN," *Stockholm Environment Institute, SEI Discussion Brief*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.sei.org/publications/escenarios-de-cambio-climatico-metodo-k-nn/>
- [19] N. Lima-Quispe, C. Cleoni, W. Rincón, Z. Gutierrez, F. Zubieta, S. Nuñez, J. Iriarte, C. Saldías, D. Purkey, M. Escobar, and H. Angarita, "Delving into the Divisive Waters of River Basin Planning in Bolivia: A Case Study in the Cochabamba Valley," *Water*, vol. 13, no. 2, p. 190, Jan. 2021, doi: 10.3390/w13020190.